

## STABILITE DE SYSTEMES DE MURS EN BLOCS DE BETON EMTOITABLES SANS JOINTS EN MORTIER

Shahriar Agaajani, Danièle Waldmann

Laboratory of Solid Structures – Université du Luxembourg, G.-D. de Luxembourg

**RÉSUMÉ :** Les blocs de construction avec des systèmes d'emboîtement sans l'utilisation de mortier ont un effet bénéfique multiple. La rapidité, la simplicité et la précision de pose apportent une économie considérable dans la main-d'œuvre, matières premières ainsi que la propreté sur chantier. La minimisation de l'impact environnemental du produit développé est recherchée en fonction d'un optimum entre la performance thermique, la résistance mécanique et le coût de production des éléments.

Il est démontré expérimentalement qu'il est possible de réaliser des murs en maçonnerie porteurs en blocs de béton emboîtables sans l'utilisation de joints en mortier. La résistance mécanique de ces structures est déterminée en fonction de leur élancement et de la surface de contact des éléments.

### 1. DISPOSITION DU BLOC DE BETON

Le module développé est constitué de deux plaques de béton qui sont reliées l'une à l'autre par l'intermédiaire de connexions transversales en béton. Dans un premier temps, le béton utilisé est de type **C50/60** à **~2400 kg/m<sup>3</sup>**. Pour des raisons thermiques, acoustiques ou encore mécaniques, les parties creuses peuvent être remplies d'isolants ou autres matériaux tels que le béton armé. Dans ce dernier cas, la fonction des blocs de béton s'approcherait de celle des blocs de coffrage.

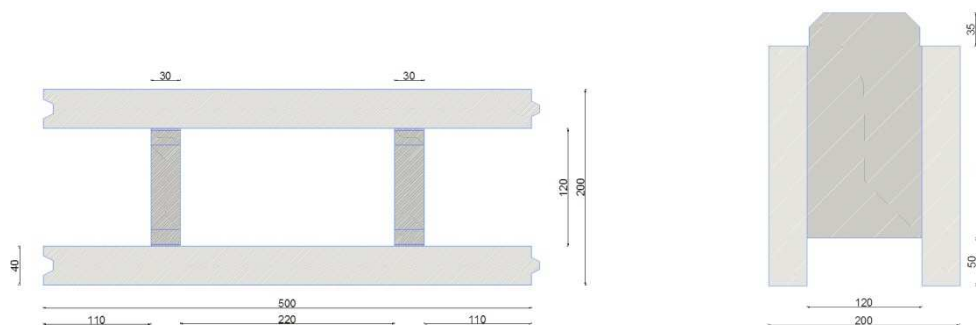


Figure 1 – Coupes en plan (à g.) et transversale (à d.) du bloc de béton

Afin d'empêcher le mouvement relatif entre les blocs de béton, un système d'emboîtement mâles/femelles est intégré sur les plaques extérieures ainsi que sur les traverses.

## 2. COMPORTEMENT THERMIQUE DES BLOCS DE BETON

Le béton utilisé lors la production des blocs de béton présente une conductivité thermique expérimentale de **1,78 W/(mK)**.

Le bloc de béton sans isolation interne ou externe, présente expérimentalement une conductivité de **0,78 W/(mK)**. Cette valeur relativement élevée par rapport aux blocs de béton creux traditionnels (allant de 0,40 à 0,60 W/(mK)) avec des résistances mécaniques semblables, s'explique de part la nature du béton utilisé. Celui-ci est de type béton C50/60 et la conductivité thermique du béton augmente exponentiellement en fonction de la masse volumique du béton /Leufgens 2010/.

À l'aide d'isolants d'une conductivité thermique de 0,035 W/(mK), nous trouvons expérimentalement que la conductivité du bloc diminue de 0,78 W/(mK) à **0,39 W/(mK)** avec une isolation interne de 120 mm, et à **0,11 W/(mK)** avec une isolation externe de 50 mm (sans isolation interne). L'isolation interne au bloc joue certes un rôle thermique bénéfique, mais son utilité diminue lorsqu'une isolation externe est appliquée en plus. Cette dernière augmente la résistance thermique de manière plus importante en coupant les ponts thermiques que constituent les traverses dans le bloc de béton.

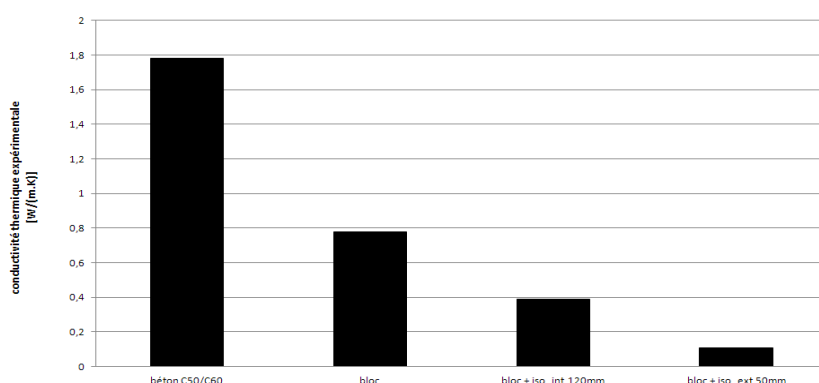


Figure 2 – récapitulation des conductivités thermiques obtenues expérimentalement

D'autres paramètres permettent de réguler la dissipation de chaleur à travers le bloc : épaisseurs des traverses et plaques extérieures, nombre de traverses, type de béton et type d'isolation interne ou externe /Agaajani 2011/.

## 3. COMPORTEMENT MÉCANIQUE ET STABILITE GENERALE DU MUR

### 3.1 Variations dimensionnelles des éléments emboîtables

Avant une éventuelle production en chaine dans l'industrie, les éléments emboîtables sont produits manuellement par l'intermédiaire de coffrages en bois. Les tolérances de production de ces coffrages ainsi que le rétrécissement dû au retrait non négligeable du béton impliquent des imprécisions dimensionnelles dans les éléments fabriqués. Ces variations dimensionnelles de la production sont visualisées ci-dessous par la mesure d'un échantillon de blocs de béton. Les résultats sont affichés sous forme de fonctions de densité de probabilité.

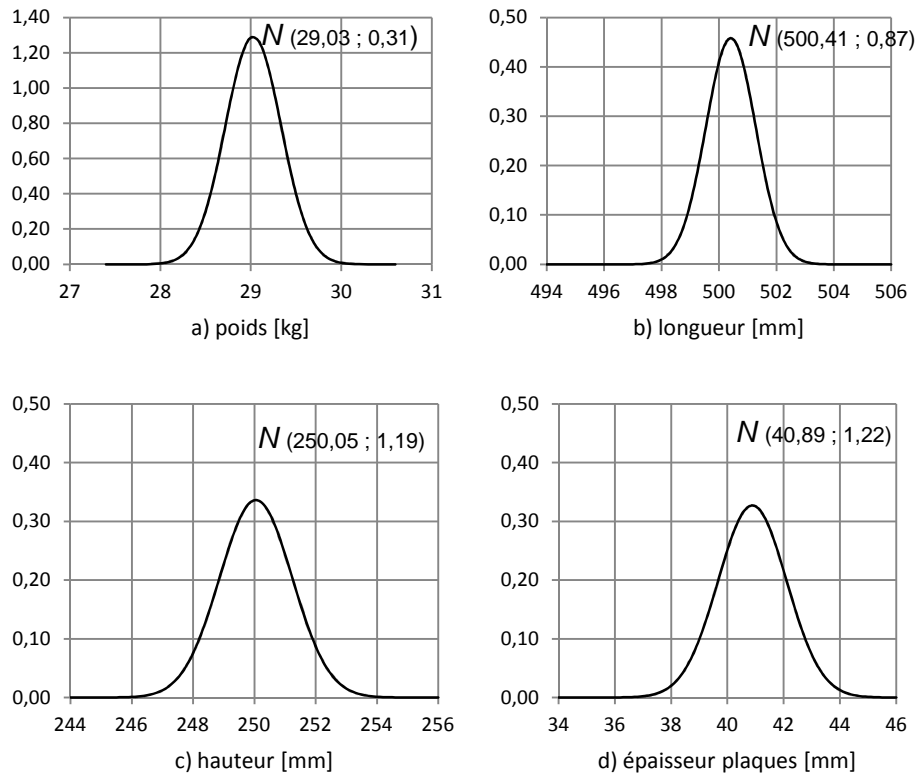


Fig. 3. Fonctions de densités de probabilités  $N(\mu, \sigma)$  en fonction des valeurs moyennes  $\mu$  et écart-types  $\sigma$ . Nombre d'échantillons  $n = 20$ .

Les figures 3a, respectivement 3b-c-d, montrent les variations de poids ainsi que celles des dimensions des blocs de béton produits.

Ces distributions montrent que le poids (Figure 3a) présente l'écart-type le plus faible par rapport aux dimensions des éléments. Avec un écart-type de 0,31 kg, 95,5% de la production dispose d'une masse comprise entre 28,71 et 29,33 kg.

Lors de la construction de murs avec des blocs emboîtables sans joints intercalaires, il est primordial de s'assurer que les éléments disposent exactement de la même hauteur après leur production, afin de permettre une dispersion des charges uniformes entre les rangées de blocs.

La Figure 3c montre que 68,3% de la production ( $\mu \pm 1\sigma$ ) dispose d'une hauteur comprise entre 248,9 et 251,2 mm, et 95,5% entre 247,7 et 252,4 mm ( $\mu \pm 2\sigma$ ). Cela implique que des différences de hauteur de l'ordre de 5 mm sont à prendre en compte avec des éléments non post-traités.

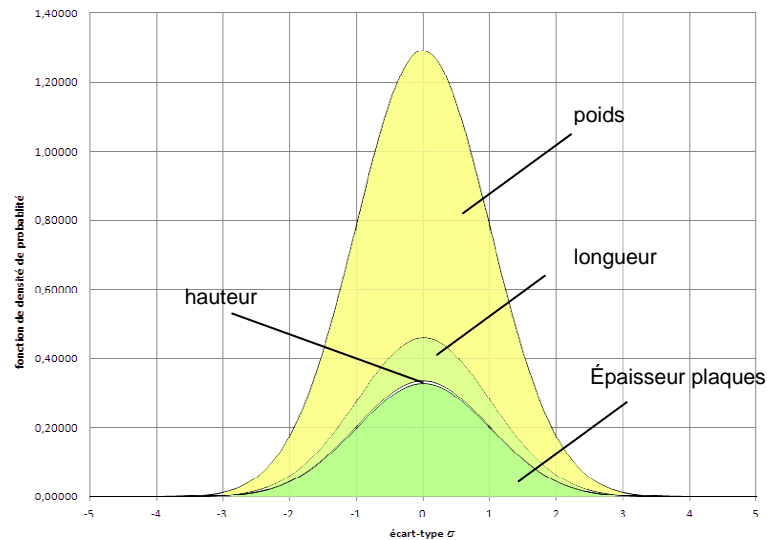


Figure 4. Distribution de la densité de probabilité en fonction des écarts-types.

Il est indispensable d'utiliser des blocs de béton ayant la même hauteur pour la construction de murs en blocs de béton emboîtables sans joints intercalaires. Le rétrécissement des éléments en béton étant très difficile à maîtriser, un fraisage des éléments est nécessaire à posteriori.

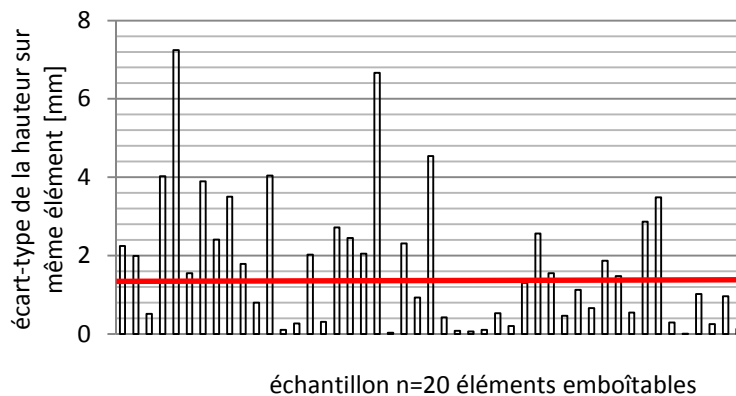


Figure 5. Variation de l'écart-type de la hauteur au sein d'un même bloc de béton emboîtable avant le post-traitement.

Au sein d'un même élément, la hauteur est variable sur les 4 côtés mesurés. La figure 5 montre cette différence de hauteur sous forme d'un écart-type. En moyenne, l'écart-type de la hauteur sur un même bloc de béton est de l'ordre de 1,7 mm – avant le post-traitement des surfaces de contact.

En fraisant les blocs à une hauteur de 248 mm ( $\sim \mu - 2\sigma$ ), nous constatons que seulement 2,25% de la production serait inexploitable et à recycler.

### 3.2 Conséquences de la non-utilisation du mortier

Le mortier a la propriété d'égaler la surface de pose et de créer une surface de contact parfaitement uniforme entre les éléments. Les blocs de béton étant fabriqués dans des usines, les différences dimensionnelles sont dès lors « absorbées » par le mortier. Dans le cas où les éléments sont simplement posés l'un sur l'autre sans mortier, des concentrations de contraintes suite à des contacts ponctuels se développent et la stabilité générale du mur est dès lors affaiblie prématurément ; l'arrivée du mur à son état limite de service est accélérée.

Des essais en grandeur réels ont permis de constater que le mortier peut assurément être écarté dans la mesure où les éléments sont fraisés en amont, afin d'avoir une surface de contact parfaitement plane et régulière.

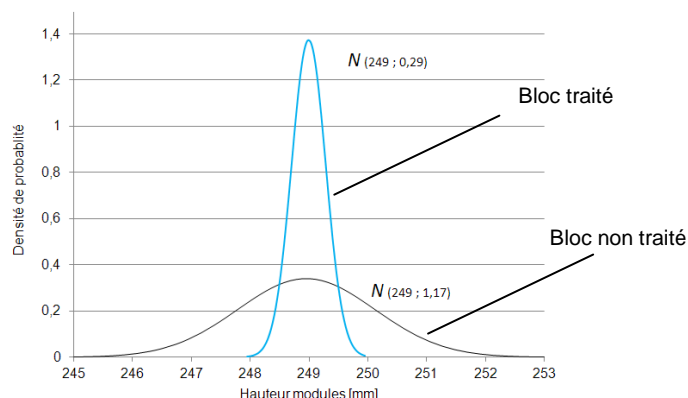


Figure 6. Distribution de la hauteur d'un échantillon de modules après traitement des surfaces de contact horizontales

Les normes européennes fixant les tolérances de fabrication sont dès lors insuffisantes, et ne décrivent pas le comportement et l'utilisation de blocs de béton sans joints de mortier /NORMES EN 771-3/.

### 3.3 Résistance du mur sous compression uniforme en fonction de la hauteur

La stabilité de différents types de murs a été vérifiée expérimentalement sous l'effet d'un chargement vertical uniforme. La mise en charge (figure 7) est assurée par un système de vérins hydrauliques reliés à des barres en acier qui elles-mêmes sont fixées dans une fondation spécifique.

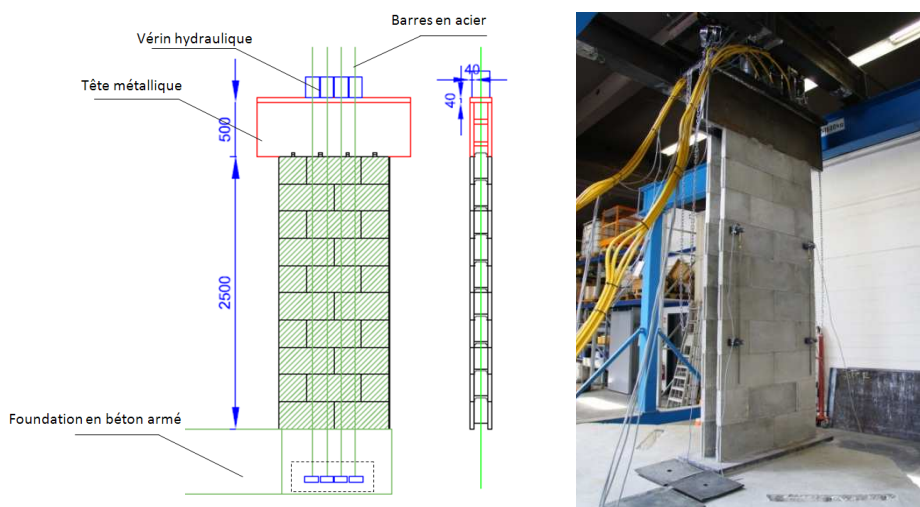


Figure 7 – Mise en charge d'un mur de 2,50 m de hauteur en blocs de béton modulaires

Les blocs de béton ont été utilisés avec et sans traitement spécifique, tel que le fraisage. Comme on le constate sur la figure 8, l'influence de ce traitement se fait amplement ressentir au niveau de la résistance du mur ( $h=1,25$  m) sous l'effet d'un chargement compression uniforme : la capacité portante du mur augmente de près de 100%. Les blocs modulaires sont ceux décrits sur la figure 1 et sont utilisés sans joints en mortier ; les blocs classiques sont des blocs de béton creux traditionnels de 240 mm d'épaisseur, ici mis en compression avec des joints en mortier. La surface de compression prise en compte dans les calculs est la surface brute du mur en question, les parties creuses comprises.

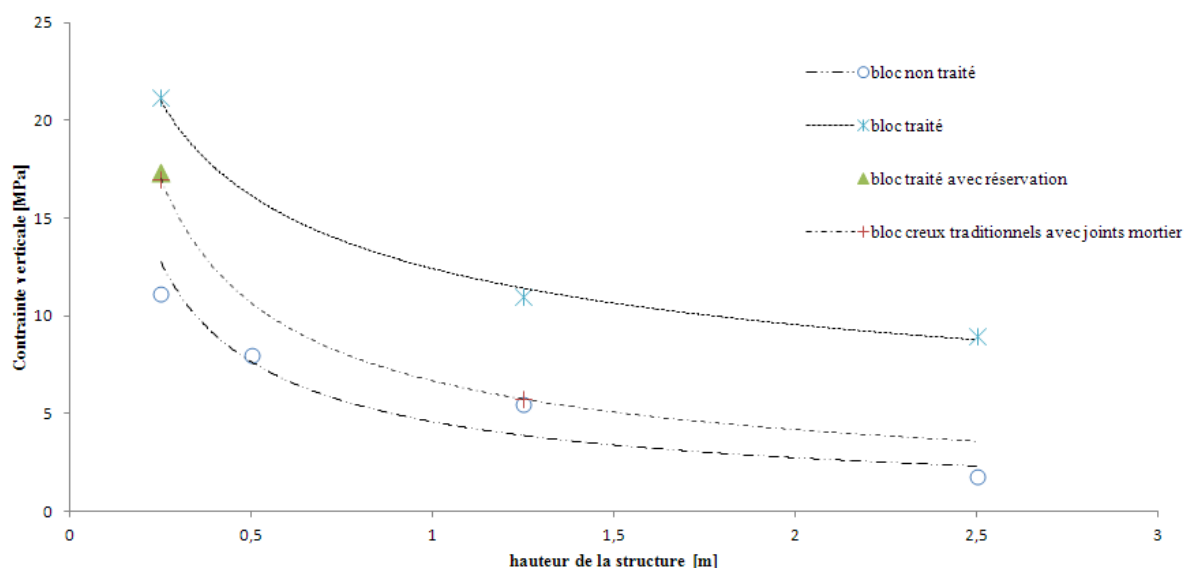


Figure 8 - Comportement mécanique de blocs de béton en fonction de la hauteur de la structure sous une compression verticale uniforme.

Une fissuration prématurée des éléments due aux imperfections n'a pas lieu et la résistance à la compression du mur est importante : 11 MPa (cas d'un mur de 1,25 m de hauteur), au lieu de 5,5 MPa pour la même construction sans post-traitement. Dans le cas d'un mur de 2,50 m de hauteur, la résistance à la compression est même multipliée par 5, passant à 9 MPa.

Enfin signalons qu'il est nécessaire de réaliser des essais supplémentaires afin de valider ces tendances de comportement.

La dilatation latérale du mur engendre des frottements relatifs entre les plaques extérieures des blocs. Les contraintes de traction ainsi introduites dans les traverses introduisent les premières fissures dans la structure (figure 9), impliquant ainsi la déstabilisation des parois portantes extérieures. Cette situation est nettement améliorée lorsque la descente des charges est uniforme, c'est-à-dire lorsque les éléments sont post-traités. De plus, le post-traitement diminue le frottement relatif entre les blocs et en conséquence les contraintes de traction dans les traverses. Expérimentalement nous trouvons un coefficient de frottement de 0.6, respectivement 0.4 pour les mêmes éléments post-traités.

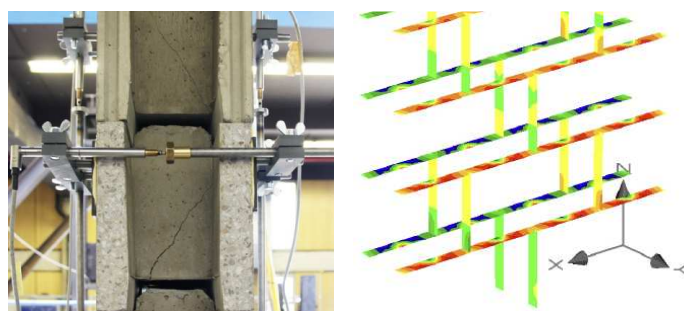


Figure 9 – développement des premières fissures sur les traverses ; simulation numérique des contraintes de cisaillement suite aux frottements relatifs entre les éléments /ATENA 2010/.

L'effet d'une réservation dans le bloc a été vérifié pour la simulation de futurs passages de gaines techniques (figure 10) ; la perte en résistance est de l'ordre de 20% pour un bloc de béton avec une réservation de 60 mm de diamètre, et pour une compression verticale uniforme. Par l'intermédiaire de simulations numériques, il pourra être affirmé que cette perte en résistance devrait être plus petite dans un mur constitué de blocs de béton munis de réservations suite à une dispersion des charges dans la structure.



Figure 10 – Réserve de 60 mm de diamètre pour la simulation de futurs passages de gaines techniques.

Le bloc de béton étant constitué de deux plaques portantes relativement fines, situées à ces extrémités (figure 1), les charges excentrées peuvent jouer un rôle défavorable envers la stabilité de la construction. L'appui des dalles en tête de murs de façade, induit des efforts excentrés et il conviendra de vérifier expérimentalement la stabilité du mur en conséquence, respectivement prévoir des éléments préfabriqués spéciaux en tête de mur afin de permettre une meilleure dispersion des efforts.

### 3.4 Etat limite de service

L'état limite de service envisagé concerne la limitation des contraintes : l'état limite de décompression, d'une part, contrainte limite de compression d'autre part. Pour ce faire, nous faisons l'hypothèse d'un comportement élastique, avec une répartition linéaire des contraintes dans la section rectangulaire ( $b \times h$ ) en service.

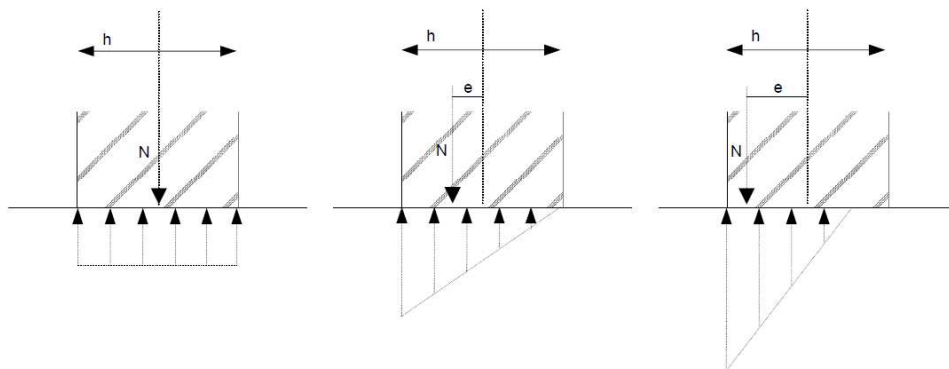


Figure 11. Cas de répartition des contraintes suivant la position du point d'application de l'action normale.

En fonction de l'excentricité ( $e$ ) de la charge sur la largeur ( $h$ ) de la section, la contrainte varie linéairement entre les deux extrémités de la section. Lorsque la charge est appliquée au bord du noyau central ( $e=h/6$ , voir §3.5), la contrainte est doublée sur une extrémité, alors que l'autre devient nulle. Avec l'excentricité croissante, la contrainte augmente d'une part suivant une loi hyperbolique et produit rapidement un dépassement de la capacité portante de résistance de la section, et d'autre part produit le décollement (décompression) d'une partie de la section (Figure 11). Il convient de limiter l'excentrement au bord du noyau central :  $e < h/6$  /Matriche 2007/.

### 3.5 Calcul du noyau central

Pour les matériaux dont la résistance à la traction est négligeable, il est intéressant de trouver la région de la section droite dans laquelle l'effort normal de compression excentré peut agir sans produire aucune contrainte de traction. Cette région est le noyau central de la section /Frey 2000/.

Dans le cas d'une flexion composée oblique, agit sur une section en plus de l'effort normal des moments de flexion  $M_y$  et  $M_z$ . La contrainte normale en un point de la section vaut :

$$\sigma(y, z) = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_y} z - \frac{M_z}{I_z} y \quad (1)$$

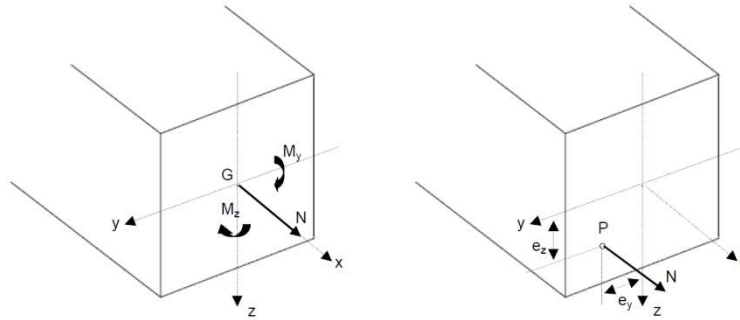


Figure 12. Représentation d'une flexion composée oblique.

Les moments de flexion peuvent s'exprimer sous forme de l'effort normal N excentré (figure 12) :

$$M_y = N e_z \text{ et } M_z = N e_y \quad (2)$$

Le plan des contraintes (équation 1) coupe la ligne de contrainte nulle lorsque :

$$\sigma(y, z) = 0 \quad (3)$$

Dès lors, l'intersection de l'équation (3) et les axes y et z définit le noyau central de la section :

$$|z_0| = |\sigma(0, z_0)| = \frac{I_y}{A e_z} \text{ et } |y_0| = |\sigma(y_0, 0)| = \frac{I_z}{A e_y} \quad (4)$$

Pour une section rectangulaire, de largeur b et de hauteur h, le noyau central est un losange centré sur le centre géométrique de la section, et dont les diagonales ont des longueurs h/3 et b/3. Tout effort normal se trouvant dans cette zone géométrique n'implique dès lors aucun effort de traction dans la section.

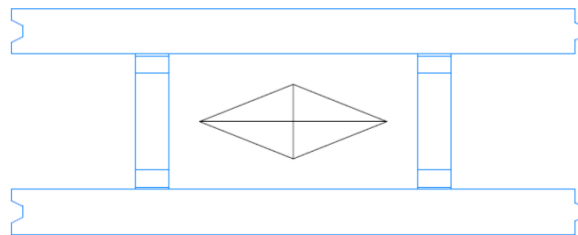


Figure 13. Représentation du noyau central dans le bloc de béton.

Il convient ainsi de limiter l'excentricité des efforts sur la structure en maçonnerie dans le noyau central défini par la Figure 13. Toute excentricité en dehors de cette zone, induit le décollement transversal ou longitudinal des éléments, et il en résulte une augmentation importante des contraintes dans les sections encore en compression.



### 3.6 Approche analytique pour la détermination de l'Etat-limite ultime

Les NORMES EN 1996-1-2006 proposent de déterminer la résistance d'un mur en maçonnerie, avec joints en mortier, à l'aide de coefficients réducteurs dépendant de la géométrie, de l'élancement, des conditions de bord et de l'excentricité des actions /NORMES EN 1996-1-2006/. A noter qu'il n'existe pas de normes définissant analytiquement la capacité d'un mur en maçonnerie sans joints en mortier. La valeur de calcul de la charge verticale maximale à appliquer,  $N_{Ed}$ , doit être inférieure ou égale à la résistance aux charges verticales du mur  $N_{Rd}$ . La valeur de calcul  $N_{Rd}$ , par unité de longueur, est donnée par :

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} \quad (5)$$

$$N_{Rd} = \phi t f_d \quad (6)$$

Où

- $\phi$  est un coefficient de réduction, à appliquer au niveau inférieur, supérieur ou au centre du mur. Il tient compte des imperfections du mur, de l'excentricité des charges, et des conditions d'appuis.
- $t$  est l'épaisseur du mur
- $f_d$  est la résistance de calcul à la compression de la maçonnerie.

Similairement, les valeurs de résistance à la compression obtenues expérimentalement dans le cas d'un chargement vertical uniforme (figure 8), nous permettent dans un premier temps, de déterminer la résistance ultime de la structure  $N_u$  par l'intermédiaire d'un coefficient réducteur  $\phi_1$  dans le cas de blocs de béton modulaires sans joints en mortier :

$$N_u = \phi_1 t f_u \quad (7)$$

Où

- $\phi_1$  est un coefficient de réduction
- $t$  est l'épaisseur du mur (200 mm)
- $f_u$  est la résistance ultime à la compression d'un module de béton

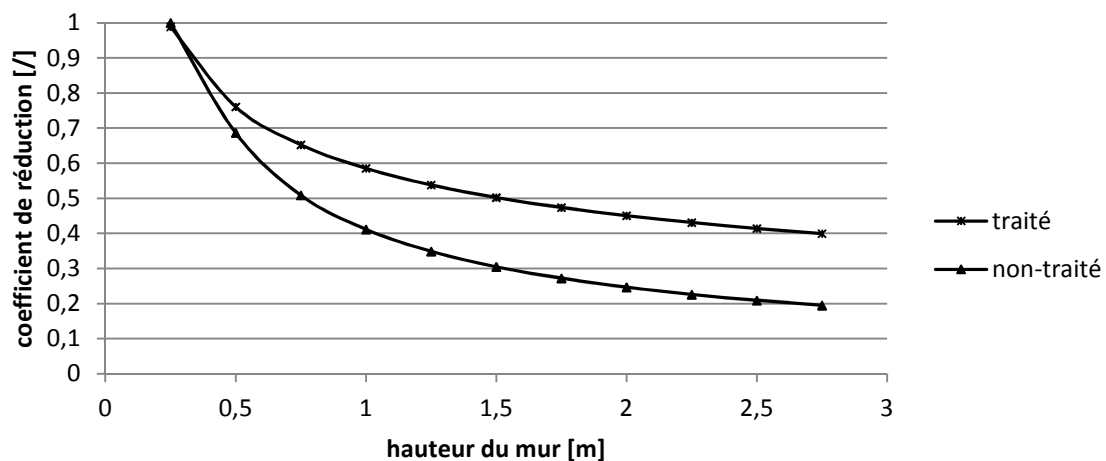


Figure 14. Effet de l'élancement sur la résistance à la compression uniforme du mur, avec et sans traitement des surfaces de contact.

Ces coefficients de réduction de la résistance du mur en fonction de l'élancement, obtenus expérimentalement, restent valables dans le cas d'un chargement uniforme, pour la configuration de conditions d'appuis donnée et des modules tels que décrit sur la figure 1.

Des essais supplémentaires à compléter par des études numériques paramétrisées sont nécessaires pour la détermination du coefficient réducteur en fonction des efforts excentriques et suivant différentes conditions de bord.

#### **4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

Les essais expérimentaux ont permis d'affirmer qu'il est possible de construire des murs en maçonnerie en modules de bloc de béton sans l'utilisation de mortier, en passant par un post-traitement des éléments après production. Bien qu'un traitement spécial des éléments engendre des frais de production supplémentaires, le bénéfice en main d'œuvre, matières premières et temps de construction devrait rendre la commercialisation des éléments intéressante.

Des essais supplémentaires doivent encore être effectués afin de vérifier la stabilité du mur en fonction de forces ponctuelles, excentriques et horizontales. De même, en passant par une analyse de cycle de vie, un choix judicieux des isolants internes et externes doit être effectué afin de diminuer au maximum l'impact écologique des produits sur l'environnement. Une éventuelle intégration de matériaux à changement de phase va également être étudiée.

#### **REFERENCES**

- Leufgens, N., Waldmann, D., 2010,  
„Mechanische und Thermische Untersuchungen zur Entwicklung eines Wärmedämmsteines aus Leichtbeton“, RUES, University of Luxembourg, pp 72.
- Agajani, S., Waldmann, D., 2011,  
« Nouveaux systèmes de murs isolants en béton », Accepted Paper for RF2B 2011, Editor : Courard, L. ; Waldmann, D. ; Lecomte, A., RUES, University of Luxembourg
- NORMES EN 771-3 :2003 (F) Partie 3,  
« Eléments de maçonnerie en béton de granulats courants et légers », version allemande EN 771-3:2003 + A1:2005.
- ATENA, Cervenka, V., Jendele, L., Cervenka, J., March 2010, “Program documentation – Theory”, Prague.
- Matriche R., 2007, Pathologies, rénovation et réhabilitation des structures, Belgique, ULB
- François Frey, 2000, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse. Analyse des structures et milieux continus – mécanique des structures, p 92
- NORMES EN 1996-1-2006 (F) Calcul des ouvrages en maçonnerie. Règles générales pour ouvrages en maçonnerie armée et non armée ; CEN Comité Européen de Normalisation ; Résistance caractéristique à la compression.